

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.2\(476\).11](https://doi.org/10.15589/znp2019.2(476).11)  
УДК 66.094.8:661.5

## HIGH-TEMPERATURE NEUTRALIZATION OF NITROGEN OXIDES IN THE EXHAUST GAS OF SHIP MOTORS

## ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ НІТРОГЕН ОКСИДІВ У ВИХЛОПНИХ ГАЗАХ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Serhii I. Kuznietsov

ksieko@rambler.ru

ORCID: 0000-0003-1766-931X

Volodymyr O. Malieiev

maleev62@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1363-6502

Violeta M. Bezpalchenko

bezpalchenkov@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1355-7938

С. І. Кузнєцов,

канд. техн. наук, доцент

В. О. Малєєв,

канд. с.-г. наук, доцент

В. М. Безпальченко,

канд. хім. наук, доцент

*Kherson National Technical University, Kherson*

*Херсонський національний технічний університет, м. Херсон*

**Abstract.** The purpose of the research was to develop a method of thermal decomposition of nitrogen oxides, which ensures the purification of the exhaust gases of diesel installations to the maximum permissible concentrations. Feasibility studies have been developed for low-power systems with high nitrogen oxide content in the exhaust gases. The process of thermal decomposition was investigated in the temperature range of 500–50 000 °C. The experiments were performed on a 20 kW plasma torch with a tungsten cathode and a copper anode. Nitrogen-forming gas was used as a plasma gas, nitrogen oxide dimer (IV) dimer as a source of nitrogen. The initial concentration of pollutants in the experiments was 0,01–10%, and the temperature in the reactor 2 000–2 100 °C. With increasing concentration, the degree of decomposition of gases increased. At the initial concentration of nitrogen oxides in the gas mixture 5% the degree of decomposition was 52% (at their concentration at the outlet – 2,4%). When the initial concentration of nitrogen oxides increased from 5 to 10%, their decomposition rate increased to 77%. At the same time, their concentration at the output remained at 2,4%. Studies of gaseous (hydrogen, ammonia, methane) and liquid (kerosene, gasoline, fuel oil) reducing agents have shown that, in the presence of these substances, the decomposition reaction of nitrogen oxides shifts to the right, that is, towards the decay of pollutants into neutral substances (nitrogen, oxygen). A high-temperature method for neutralizing the nitrogen oxides of marine engines is proposed. It is established that by introducing gaseous reducing agents the reaction of high-temperature decomposition of nitrogen oxides can be shifted towards the decomposition of them into their initial components. The concentration of pollutants after decomposition can be increased to 0,1–0,3% at an initial concentration of 2–3%. The paper shows the possibility of thermal neutralization of nitrogen oxides in the exhaust gases of marine engines without the use of expensive catalysts and large equipment.

**Key words:** nitrogen oxides; neutralization; exhaust gases; thermal method.

**Анотація.** Мета досліджень полягала в розробці методу термічного розкладання нітроген оксидів, який забезпечує очищення вихлопних газів дизельних установок до гранично допустимих концентрацій. Розроблені техніко-економічні розрахунки для малопотужних систем із високим вмістом нітроген оксидів у вихлопних газах. Процес термічного розкладання досліджувався в інтервалі температур від 500 до 50 000 °C. Досліди проводились на дуговому плазмотроні потужністю 20 кВт із вольфрамовим катодом і мідним анодом. Як плазмутворюючий газ використовувався азот, за джерело нітроген оксидів – димер нітроген (IV) оксиду. Початкова концентрація забруднювачів у дослідях становила 0,01–10%, а температура в реакторі – 2 000–2 100 °C. З підвищенням їх концентрації ступінь розкладання газів збільшувався. За початкової концентрації нітроген оксидів у газовій суміші 5% ступінь розкладання становив 52% (за їх концентрації на виході – 2,4%). За збільшення початкової концентрації нітроген оксидів із 5 до 10% рівень їх розкладання підвищувався до 77%. Водночас їх концентрація на виході залишалася на рівні 2,4%. Дослідження газоподібних (водень, амоніак, метан) і рідких (гас, бензин, мазут) відновників показали, що за наявності цих речовин реакція розкладання нітроген оксидів зміщується праворуч, тобто в бік розпаду забруднювачів на нейтральні речовини (азот, кисень). Запропоновано високотемпературний спосіб нейтралізації нітроген оксидів суднових двигунів. Встановлено,

що шляхом уведення газоподібних відновників у реакцію високотемпературного розкладання нітроген оксидів можна змістити у бік розпаду їх на початкові складові частини. Концентрація забруднювачів після розкладання може бути доведена до 0,1–0,3% за початкової концентрації 2–3%. У роботі показана можливість термічного знешкодження нітроген оксидів у вихлопних газах суднових двигунів без застосування коштовних каталізаторів та великогабаритного устаткування.

**Ключові слова:** нітроген оксиди; нейтралізація; вихлопні гази; термічний метод.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Труднощі, пов'язані зі створенням малотоксичного і водночас економічного суднового дизельного двигуна, полягають у проблемі скорочення викидів нітроген оксидів ( $N_xO_y$ ), які разом із чадним газом (CO) і вуглеводнями ( $C_nH_m$ ) є токсичними компонентами відпрацьованих газів. Для низькооборотних дизелів як паливо використовують важкі фракції нафти – флотський мазут, а для середнеоборотних моторів може використовуватися як флотський мазут, так і дизельне паливо. Утворення оксидів нітрогену у двигуні безпосередньо не пов'язане із процесом горінням палива. Це продукт хімічних реакцій азоту, що міститься в атмосферному повітрі. Для цих реакцій потрібні тільки кисень і висока температура.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Забруднення повітря техногенними газоподібними речовинами сьогодні стали однією з найбільш актуальних сучасних проблем [1, с. 59]. У Конституції країни закріплено право громадян на безпечне навколишнє середовище [2, ст. 50]. Основна маса техногенних забруднень утворюється під час спалювання органічного палива. Ефективне очищення димових газів від нітроген оксидів – актуальна проблема екобезпеки, вирішення якої становить теоретичний інтерес і має велике практичне значення [3, с. 59; 4, с. 102]. Очищення вихлопних газів поліпшує екологічну обстановку і заощаджує природні ресурси [5, с. 36; 6, с. 75; 7, с. 193; 8, с. 352; 9]. Відомі різні методи очищення вихлопних газів від оксидів нітрогену: часткова рециркуляція відпрацьованих газів, зниження температури в зоні згорання та каталітичний [10, с. 150; 11, с. 58; 12, с. 20; 13, с. 9; 14, с. 33]. Сутність останнього полягає в тому, що відпрацьовані гази проходять крізь резервуар із наповнювачем у вигляді гранул, сот, решіток, які вкриті тонким (молекулярним) шаром каталізатора [15, с. 117; 16, с. 24]. Найкращу активність мають каталізатори на основі платини. Вони дозволяють знешкоджувати до 96–98% токсичних сполук, перетворюючи їх на нейтральні продукти. Водночас наявні у вихлопних газах домішки здатні отруювати каталізатор. Отже, каталітичний метод пов'язаний із використанням складного устаткування та коштовних каталізаторів [17, с. 24; 18].

## ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

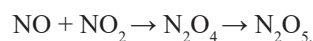
Каталітичний метод розкладання оксидів нітрогену може бути застосовано лише для газів, що мають у своєму складі не більше 1% нітроген оксидів і до 5% кисню. Крім того, застосування каталітичного методу очищення газів доцільно для систем, що працюють під тиском.

**Мета дослідження** – розробка методу термічного розкладання нітроген оксидів, який забезпечує очищення вихлопних газів дизельних установок до гранично допустимих концентрацій.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Нами проведені теоретичні дослідження і техніко-економічні розрахунки для малопотужних систем із високим вмістом нітроген оксидів у вихлопних газах (вихлопні гази дизельних установок належать саме до таких систем). Для досягнення мети найбільш доцільно застосовувати термічні методи розкладання  $N_xO_y$  на нейтральні продукти. Основу цього методу становить реакція розкладання оксиду нітрогену (II):  $2NO \rightarrow N_2 + O_2$ . Цей метод відрізняється простотою, компактністю, незначними капітальними й експлуатаційними витратами.

Оксигенові сполуки нітрогену можуть існувати у вигляді таких оксидів: оксид нітрогену (I)  $N_2O$ , оксид нітрогену (II)  $NO$ , оксид нітрогену (IV)  $NO_2$ , оксид нітрогену (III)  $N_2O_3$ , димер оксиду нітрогену (IV)  $N_2O_4$ , оксид нітрогену (V)  $N_2O_5$ . Також існують нестабільні з'єднання у вигляді нітрозілазиду  $N_4O$ , тринітраміду  $N(NO_2)_3$  і нітратного радикала –  $NO_3$ . Залежно від валентності нітрогену його оксигенові сполуки мають різний склад, отже, різні фізико-хімічні властивості. Так, наприклад, димер оксиду нітрогену (IV) є активною речовиною, що реагує майже з усіма органічними і неорганічними сполуками, тоді як оксид нітрогену (II) – майже індиферентна речовина. Ступінь окиснення нітрогену у вищезазначених сполуках значною мірою визначається температурою. Залежно від температури можуть існувати ті або інші оксиди нітрогену. За наявності окисника (кисню або озону) і низької температури реакція окиснення оксиду нітрогену (II) відбувається самочинно і необоротно в такому напрямі:



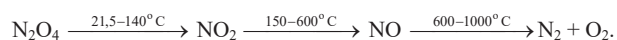
Оксид нітрогену (V) може існувати у твердому стані і за низьких температур. Твердий  $N_2O_5$  у своїй

стійкій формі є нітратом нітронія  $\text{NO}_2^+ + \text{NO}_3^-$ . За нагрівання в газовій формі він дисоціює на  $\text{NO}_2$  і  $\text{NO}_3^-$ .  $\text{NO}_3^-$  легко окиснюється, віддаючи атом кисню. Оксид нітрогену (IV) легко полімеризується в димер за оборотною реакцією:  $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4$ .

Ступінь полімеризації також залежить від температури. Уже за температури 21,15 °C рідкий  $\text{N}_2\text{O}_4$  дисоціює на молекули  $\text{NO}_2$ . А за температури понад 140 °C реакція цілком зміщується вправо і в газовій фазі може існувати тільки  $\text{NO}_2$ . За подальшого нагрівання оксиду нітрогену (IV) він розпадається:  $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$ .

Повне розкладання оксиду нітрогену (IV) на оксид нітрогену (II) і кисень настає за температури 600 °C. Оксид нітрогену (II) досить стійкий. Проте за температури понад 1 000 °C він перебуває в дисоційованому стані:  $2\text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2 + \text{O}_2$ .

Отже, температурна область існування різних оксидів нітрогену в газовій фазі може бути представлена такою схемою:



Шляхом нагріву вищих оксидів нітрогену можна добитися їх розкладання на нижчі, зокрема й до елементарного азоту і кисню. Ця закономірність покладена в основу розробленого нами методу термічного розкладання оксидів нітрогену. Реакція утворення і розкладання оксиду нітрогену (II) оборотна:  $2\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} - 43\,140 \text{ кал (179,9 Дж)}$ .

Рівноважна концентрація оксиду нітрогену (II), що отримується з азоту і кисню в інтервалі температур від 1 000 до 4 000 °C [19, с. 118]. Значення рівноважних концентрацій оксиду нітрогену (II) залежно від температури розміщені в таблиці 1 [20, с. 213].

Дані, наведені в таблиці 1, свідчать, що, нагріваючи газ до високих температур, можна не лише синтезувати оксид нітрогену (II) з молекулярних азоту і кисню, але й розкласти його на початкові складові частини.

**Таблиця 1.** Залежність рівноважних концентрацій оксиду нітрогену (II) від температури

Температура, °C	Рівноважна концентрація оксиду нітрогену (II), %	Час встановлення динамічної рівноваги, с
1 000	0,02	$4 \cdot 10^5$
1 500	0,044	$1,8 \cdot 10^2$
2 000	1,34	1,00
2 500	2,40	$5 \cdot 10^{-5}$
300	4,00	$7 \cdot 10^{-9}$

З погляду знешкодження нітрозних газів залишковою рівноважна концентрація оксидів нітрогену, що досягається шляхом простого термічного розкладання, є занадто високою, а час встановлення рівноважних

концентрацій у ділянці низьких температур занадто великий. Так, наприклад, якщо нагрівати нітрозний газ до температури 2 000 °C, його концентрацію легко знизити до 1,34%. Для цього знадобиться всього 1 секунда. Для зниження концентрації до 0,02% знадобиться час  $4 \cdot 10^5$  с, що в реальних умовах неможливо, оскільки буде пов'язано з установкою реакційного апарата місткістю 1 000 м³ на 1 м³ нітрозного газу. Швидкість утворення оксидів нітрогену прямо пропорційна вмісту в суміші кисню. Якщо у процесі розкладання нітроген оксидів із системи відводити (зв'язувати) кисень, що утворюється, то швидкість утворення оксидів нітрогену і рівноважна концентрація можуть бути знижені. Ця властивість використана в методі термічного розкладання оксидів нітрогену. Як компоненти, що зв'язують кисень, можуть бути використані газоподібні, рідкі й тверді відновники. Наприклад, водень, оксид карбону (II), метан (природний газ), амоніак, газ, бензин, мазут, кокс, вугілля, графіт. Ці ж горючі компоненти використовують для підігрівання газу до температури розкладання.

Завдання полягало у вивченні процесу термічного розкладання оксидів нітрогену в інтервалі температур від 500 до 50 000 °C. Для досягнення таких температур використовувався дуговий плазмотрон потужністю 20 кВт із вольфрамовим катодом і мідним анодом, які охолоджувалися проточною водою. Стабілізація дуги – магнітно-вихрова. Положення плазмотрона вертикальне, з нижнім розташуванням катода. До вихлопного сопла плазмотрона приєднувався реактор, що використовувався водночас і як теплообмінник для попереднього підігрівання газу. Як плазмоутворюючий газ використовувався азот, що подавався з балона, а як джерело оксидів нітрогену – рідкий димер оксиду нітрогену (IV).

Плазмоутворюючий газ із температурою 10 000–15 000 °C виходив із плазмотрона в реактор, де змішувався з нітрозним газом, заздалегідь підігрітим у теплообміннику до температури 600 °C. У результаті змішування газових потоків середньомасова температура суміші в реакторі становила від 1 000 до 3 500 °C. Крім того, установка обладнана комплексом контрольно-вимірювальних приладів для визначення витрати газу, температури й інших параметрів. Для правильної і стійкої роботи спочатку у плазмотрон подавалися плазмоутворюючий газ і охолоджуюча вода, після чого на анод і катод подавалася напруга. Коли напруга досягала певних параметрів (65–75 В), замикали електроди, після чого знову розводили їх на відстань 4–5 м. У діючий плазмотрон вводили оксиди нітрогену, кількість яких відповідала заданій концентрації NO в газовій суміші. Отримана газова суміш нагрівалася до температури 2 000–4 000 °C. За цієї температури відбувалося розкладання оксидів на молекули – азот і кисень. Ступінь розкладання оксидів нітрогену визначався виміром їхньої концентрації на

вході і на виході методом евакуйованих колб. Початкова концентрація оксидів нітрогену в цих дослідках становила від 0,001 до 10%, а середньомасова температура в реакторі – 2 000–2 100 °С. Температура в реакторі визначалася розрахунковим шляхом, виходячи з теплового балансу плазмотрона. З підвищенням концентрації оксидів нітрогену ступінь розкладання їх збільшується. Так, наприклад, за початкової концентрації оксидів нітрогену  $NxOy$  в газовій суміші 5% ступінь розкладання становить 52% (за концентрації оксидів нітрогену на виході 2,4%). У разі збільшення початкової концентрації оксидів нітрогену з 5 до 10% ступінь їх розкладання підвищувався до 77%. Водночас концентрація  $NxOy$  на виході залишалася на рівні 2,4%.

### ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Однакова концентрація оксидів нітрогену на виході (на вході 4% і вище) пояснюється наближенням системи до рівноважного стану за даної температури. Водночас варто зазначити, що концентрація оксидів нітрогену після розкладання залишається досить високою. Так, наприклад, концентрація оксидів нітро-

гену в газовій суміші на виході становила приблизно 2%. Такий ступінь розкладання оксидів нітрогену з погляду санітарного очищення є незадовільним.

Тому друга серія дослідів була присвячена питанню вивчення впливу відновників на реакцію розкладання оксидів нітрогену. Були досліджені газоподібні (водень, амоніак, метан), рідкі (гас, бензин, мазут) та тверді відновники (кокс, вугілля, графіт). Дослідження газоподібних і рідких відновників показали, що за їх наявності реакція розкладання оксидів нітрогену зміщується праворуч, тобто в бік розпаду на азот і кисень.

### ВИСНОВКИ

Запропоновано високотемпературний спосіб нейтралізації оксидів нітрогену суднових двигунів. Встановлено, що шляхом уведення газоподібних відновників реакцію високотемпературного розкладання оксидів нітрогену можна змістити в бік розпаду їх на початкові складові частини. Концентрація  $NxOy$  після розкладання може бути доведена до 0,1–0,3% за початкової концентрації 2–3%. Отже, показана можливість термічного знешкодження оксидів нітрогену без застосування коштовних каталізаторів.

### REFERENCES

- [1] Kuznetsov, S.I. (2001). *Ekologichnyy monitorynh vodnoho baseynu v systemi povnoho monitorynhu navkolyshn'oho seredovyscha* [Ecological monitoring of the water basin in the system of full monitoring of the environment]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference 01: *Problemy i perspektivy ochyshchennya ta povtornoho vykorystannya vody*. (pp. 58–63). Kharkov.
- [2] Zakon Ukrainy "Pro okhoronu navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyscha" № 1264–XII (25.06.1991) Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/conv/page>.
- [3] Kuznetsov, I. Ye. & Troitskaya, T. M. (1979). *Zashchita vozdušnogo basseyna ot zagryazneniya vrednymi veshchestvami khimicheskikh predpriyatiy* [Protection of the air basin from pollution by harmful substances of chemical enterprises]. Moscow: Khimiya. Publ. [in USSR]
- [4] Yermekin, A.I., Kvashnin, I.M., Yunkerov, Yu.I. (2000). *Normirovaniye vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu* [Rationing of pollutant emissions into the atmosphere]: *navchal'nyy posibnyk*. Moscow. Publ. [in Russian].
- [5] Mishchenko, A. V. & Kuznetsov, S. I. (2018). Termicheskiy metod neytralizatsii oksidov azota [Thermal method of neutralizing nitrogen oxides]. *Visnyk KHNTU*, no. 2(65), pp. 35–40.
- [6] Kuznetsov, S. I. (2007). Ochistka otkhodyashchikh gazov izvestkovo-obzhigovykh pechey [Exhaust gas purification of calcareous kilns]. *Visnyk KHNTU*, no. 3(29), pp. 74–86.
- [7] Mikhaylik, V. D., Kuznetsov, S. I., Chesnokov, V. L. (2008). Problema promyshlennoy ekologii Khersonshchiny [The problem of industrial ecology of Kherson region]. *Visnyk KHNTU*, no. 4(33), pp. 192–196.
- [8] Kuznetsov, S.I. (2012). Modeling of hydrodynamics of a tsiklonno-rotational deduster of the raised efficiency. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 85, pp. 349–355.
- [9] Mykhaylyk, V.D., Mykhaylyk, S.V., Kuznetsov S.I. *Prystriy dlya ochyshchennya i utylizatsiyi tepla vidkhidnykh haziv* [Device for purification and utilization of heat of exhaust gases]. Patent UA, no. 67180, 2004.
- [10] Kuznetsov, S.I. (2002). Sanitarnaya ochistka otkhodyashchikh gazov kotel'nykh [Sanitary purification of boiler exhaust gases]. Proceedings of the 4th All-Ukrainian Scientific and Methodical Conference 02: *Ekolohiya ta inzheneriya, stan, naslidky, shlyakhy stvorenniya ekologichno chystykh tekhnolohiy*. (pp. 150–151). Dniprodzerzhyn'sk.
- [11] Kuznetsov, S.I. (2011). Metod neytralizatsii dymovykh gazov shchelochnymi stochnymi vodami [Flue gas neutralization method with alkaline sewage]. Abstracts of Paper International Scientific and Technical Conference 11: *Legkaya i tekstil'naya promyshlennost': sovremennoye sostoyaniye i perspektivy*. (pp. 58–59). Kherson.
- [12] Levchenko, O.H., Hryshchenko, S.A., Kovtun, I.M. (2003). Metody neytralizatsiyi toksychnykh rechovin u zvaryuval'nomu vyrobnytstvi [Methods of neutralization of toxic substances in welding production]. *Visnyk Natsional'noho naukovo-doslidnoho instytutu okhorony pratsi*, no. 6, pp. 19–23.
- [13] Kuznetsov, S. I. & Sakovych, B.P. (2019). Multi-tier absorber for cleaning of exhaust gases of kilns. *Ekologichni nauky*, no. 24, pp. 8–11.



- [14] Kuznetsov, S. Y. (2017). Zashchyta atmosfernocho vozdukha ot oksydov azota pry proyzvodstve shchhavelevooy kysloty [Protection of atmospheric air from nitrogen oxides in the production of oxalic acid]. Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference 17: *Suchasni khimichni tekhnolohiyi: ekolohichnist', innovatsiyi, efektyvnist'*. (pp. 32–39). Kherson.
- [15] Atroshchenko, V. I. (Ed.). (1985). *Tekhnologiya svyazannogo azota* [Bound nitrogen technology]. Kyiv : Vishcha shkola. Publ. [in USSR].
- [16] Krichmar, S. I. & Bezpal'chenko, V. M. (2011). Gazovyy sensor dlya obnaruzheniya oksidov azota [Gas sensor for detecting nitrogen oxides]. *Visnyk KHNTU*, no. 1(40), pp. 22–25.
- [17] Kuznetsov, I. Ye. (1971). *Novyye metody ochistki gazov ot okislov azota* [New methods for gas purification from nitrogen oxides]. Kyiv: Ukr. NIIT. Publ. [in USSR].
- [18] Bor'ba s zagryazneniyem vozdukha pri pomoshchi kataliticheskogo okisleniya CO: Zayavka 45–20682 Yaponiya: MKI V 01 D. №34; zayavl. 14.02.07. Publ. 10.06.07.
- [19] Kuznetsov, S. I. & Zlotnikova, K. N. (2018). Neytralizatsiya oksidov azota [Neutralization of nitrogen oxides]. Proceedings of the Conference 18: *The development of technical sciences: problems and solution*. (pp. 117–121). Brno.
- [20] Boyko, A. A. & Kuznetsov, S. I. (2017). Neytralizatsiya oksidov azota dizel'nykh sudovykh ustanovok v nizkotemperaturnoy plazme [Neutralization of nitrogen oxides of diesel ship installations in low-temperature plasma]. Proceedings of the 7th All-Ukrainian Conference 17: *Suchasni problemy mors'koho transportu ta bezpeka moreplavstva*. (pp. 212–216). Kherson.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кузнецов С. И. Экологический мониторинг водного бассейна в системе полного мониторинга навколишнього середовища. *Проблеми і перспективи очищення та повторного використання води* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції 01. Харків, 2001. С. 58–63.
- [2] Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25 червня 1991 р. № 1264–XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/conv/page> (дата звернення: 05.10.2019).
- [3] Кузнецов И.Е., Троицкая Т.М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. Москва : Химия, 1979. 314 с.
- [4] Еремкин А.И., Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу : учебное пособие. Москва, 2000. 176 с.
- [5] Мищенко А.В., Кузнецов С.И. Термический метод нейтрализации оксидов азота. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 2 (65). С. 35–40.
- [6] Кузнецов С.И. (2007). Очистка отходящих газов известково-обжиговых печей. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2007. № 3 (29). С. 74–86.
- [7] Михайлик В.Д., Кузнецов С.И., Чесноков В.Л. Проблема промышленной экологии Херсонщины. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2008. № 4 (33). 192–196 с.
- [8] Kuznetsov S.I. Modeling of hydrodynamics of a tsiklonno-rotational deduster of the raised efficiency. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012. Vol. 85. P. 349–355.
- [9] Михайлик В.Д., Михайлик С.В., Кузнецов С.И. Пристрій для очищення і утилізації тепла відхідних газів. *Патент України*. 2004. № 67180.
- [10] Кузнецов С.И. Санитарная очистка отходящих газов котельных. *Екологія та інженерія, стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій* : Матеріали IV Всеукраїнської науково-методичної конференції 02. Дніпродзержинськ, 2002. С. 150–151.
- [11] Кузнецов С.И. Метод нейтрализации дымовых газов щелочными сточными водами. *Легкая и текстильная промышленность: современное состояние и перспективы* : тезисы докладов Международной научно-технической конференции 11. Херсон, 2011. С. 58–59.
- [12] Левченко О.Г., Грищенко С.А., Ковтун І.М. Методи нейтралізації токсичних речовин у зварювальному виробництві. *Вісник Національного науково-дослідного інституту охорони праці*. 2003. № 6. С. 19–23.
- [13] Kuznetsov S.I., Sakovych B.P. Multi-tier absorber for cleaning of exhaust gases of kilns. *Екологічні науки*. 2019. № 24. С. 8–11.
- [14] Кузнецов С.И. (2017). Защита атмосферного воздуха от оксидов азота при производстве щавелевой кислоты. *Сучасні хімічні технології: екологічність, інновації, ефективність* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції 17. Херсон, 2017. С. 32–39.
- [15] Технология связанного азота / под ред. В.И. Атрошенко. Киев : Вища школа. 1985. 327 с.
- [16] Кричмар С.И., Безпальченко В.М. Газовый сенсор для обнаружения оксидов азота. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 2011. № 1 (40). С. 22–25.
- [17] Кузнецов И.Е. Новые методы очистки газов от окислов азота. Киев : Укр. НИИТИ, 1971. 42 с.
- [18] Борьба с загрязнением воздуха при помощи каталитического окисления CO: Заявка 45–20682. Япония: МКИ В 01 D. № 34; заявл. 14 февраля 2007 г.; опубл. 10 июня 2007 г.
- [19] Кузнецов С.И., Злотникова К.Н. Нейтрализация оксидов азота. *The development of technical sciences: problems and solutions* : Proceedings of the Conference 18. Brno, 2018. С. 117–121.
- [20] Бойко А.А., Кузнецов С.И. Нейтрализация оксидов азота дизельных судовых установок в низкотемпературной плазме. *Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства* : матеріали VII Всеукраїнської студентської наукової конференції 17. Херсон, 2017. С. 212–216).